

УДК 620.178.4

КОМПЬЮТЕРИЗИРОВАННАЯ МЕТОДИКА ПРОЧНОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ КОНСТРУКЦИЙ КОСМИЧЕСКОЙ И МОРСКОЙ ТЕХНИКИ

В.Я. Андросов, А.В. Плотников

ОАО «НПЦ «Полус», г. Томск

E-mail: polus@online.tomsk.net

Рассматриваются спектры реакции конструкции изделия при воздействии механических нагрузок различных типов. Представлен расчетно-экспериментальный метод получения реальных динамических характеристик конструкции изделий. Обоснована возможность замены одних типов механических нагрузок на другие, а также снижения воздействующей нагрузки с применением разрабатываемого программно-аналитического модуля.

Ключевые слова:

Механические внешние воздействующие факторы, испытания, спектр реакции конструкции, модальный анализ, демпфирование, программно-аналитический модуль.

Key words:

Mechanical external influencing factors, tests, reaction spectra of a structure, modal analysis, damping, program-analytical module.

Создание космической и морской техники нового поколения обуславливает принципиально более высокие требования к ее прочностным характеристикам.

Актуальнейшей проблемой НПЦ «Полус» и других предприятий является испытание изделий на механические внешние воздействующие факторы (МВВФ), а именно воспроизведение заданных параметров ударной нагрузки в виде ударного спектра, максимальные значения которого достигают 50 км/с², либо эквивалентного удара классической формы с ускорением до 35 км/с² и длительностью 1 мс.

С целью решения этой проблемы или ее минимизации разрабатывается программно-аналитический модуль, который базируется на нормативных документах и возможностях имеющихся на предприятии испытательного оборудования и программно-технических средств современного уровня, позволяющих проводить отработку конструкции аналитическим, расчетно-экспериментальным или экспериментальным путем.

Аналитический метод основывается, как правило, на конечно-элементном моделировании с использованием таких систем, как ANSYS, NA-STRAN, SolidWorks и др. Более эффективен и достоверен расчетно-экспериментальный метод вследствие возможности получения реальных характеристик – демпфирования, резонансных (собственных) частот и форм мод колебаний в любых точках конструкции. Он включает в себя как конечно-элементное моделирование, так и экспериментальный модальный анализ конструкции с последующим уточнением и подтверждением аналитической модели.

Модальное демпфирование представляет собой процент критического демпфирования и определяется по формуле [1]

$$\xi(k) = 100 \frac{\sigma(k)}{\sqrt{\omega(k)^2 + \sigma(k)^2}},$$

где $\chi(k)$ – демпфирование k -й моды, %; $\sigma(k)$ – демпфирование в точках половинной мощности, Гц; $\omega(k)$ – демпфированная собственная частота, Гц.

Резонансные свойства динамической системы характеризует добротность Q , связанная с логарифмическим декрементом затухания δ формулой [2]

$$Q = \frac{\pi}{\delta}.$$

Имея полученные экспериментальным путем значения реального демпфирования и собственных частот резонаторов конструкции, можно определить её реакцию на воздействие нагрузки конкретного типа с заданными параметрами.

Так, ударный спектр реакции резонатора конструкции при воздействии виброимпульсной нагрузки или удара классической формы с заданными параметрами вычисляется по формуле [3]

$$\ddot{x}(f) = 2\pi f_{\max} \max \int_0^t \ddot{u}(\tau) e^{-\frac{\pi\sigma}{Q}f(t-\tau)} \sin[2\pi f(t-\tau)] d\tau,$$

где $\ddot{x}(f)$ – ударный спектр реакции резонатора, м/с²; f_{\max} – верхняя частота поддиапазона, Гц; t – общее время воздействия, с; $\ddot{u}(\tau)$ – задаваемое ускорение, м/с², с длительностью воздействия τ , с; σ – логарифмический декремент затухания; Q – значение добротности резонатора; f – частота в рассматриваемом диапазоне, Гц.

В основных нормативных документах, устанавливающих требования и методы испытаний изделий электротехнической, нефтегазовой отраслей и специальной техники на МВВФ (ГОСТ 17516.1-90, ГОСТ 20.57.406-81, ГОСТ Р 51371-99, ГОСТ 16962.2-90, ГОСТ 30630.0.0-99, ГОСТ 30630.1.1-99, ГОСТ 30630.1.2-99, ГОСТ РВ 20.39.304-98, ГОСТ РВ 20.57.305-98, ГОСТ В 24880-81, ГОСТ РВ 20.57.416-98), конструкция рассматривается, в частности, как совокупность резонаторов во всем диапазоне частот с одной степенью свободы и добротностью $Q=10$.



Рис. 1. Функциональная схема программно-аналитического модуля

Алгоритм разрабатываемого программно-аналитического модуля (рис. 1) базируется на применении инновационных методов конечно-элементного моделирования и экспериментального модального анализа, позволяющих определять модальные частоты, демпфирование, рабочие формы мод колебаний и, как следствие, реальные динамические характеристики конструкции изделия.

Ядро программно-аналитического модуля основывается на внедренной в 2006 г. и успешно используемой универсальной программе пересчета параметров механических и акустических нагрузок в эквивалентные (рис. 2).

Программно-аналитический модуль выполняет сравнительный анализ значений демпфирования любого из резонаторов, полученных в результате проведения экспериментального модального анализа конструкции, со значениями демпфирования, заданными в техническом задании, государственном и отраслевом стандартах и т. д. на разрабатываемое изделие, а также определяет спектр реакции резонаторов конструкции при воздействии на нее удара классической формы или широкополосной случайной вибрации.

Результат сравнения ударного спектра реакции резонаторов конструкции с расчетным профилем удара по заданному спектру позволяет сделать вывод о допустимости кратного снижения воздействующей ударной нагрузки, что, в частности, минимизирует изменение ресурса электромеханических изделий.

На предприятии с 2008 г. проводится определение реальных динамических характеристик конструкций изделий (модальных частот, демпфирования и форм мод колебаний) методом экспериментального модального анализа с применением системы PULSE типа 3560, при этом конструкция находится в состоянии свободного подвеса с собственной частотой колебаний ниже 2 Гц.

На начальном этапе разработки программно-аналитического модуля с целью подтверждения результатов, получаемых методом экспериментального модального анализа, проведены экспериментальный модальный анализ и определение амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) конструкций пяти корпусов зарядно-разрядного устройства (ЗРУ) комплекса автоматики и стабилизации напряжения системы электропитания.

Корпуса устанавливались в безрезонансное (в рабочем диапазоне частот) приспособление для проведения испытаний на МВВФ, добротность резонансных колебаний на АЧХ определялась в одних и тех же точках конструкции на одних и тех же резонансных частотах (в точках половинной мощности) АЧХ корпуса по формуле [4]

$$Q = \frac{f_c}{f_2 - f_1},$$

где f_c – центральная частота пика; f_1, f_2 – частоты, определённые на уровне 3 дБ (точки половинной мощности) ниже уровня центральной частоты.

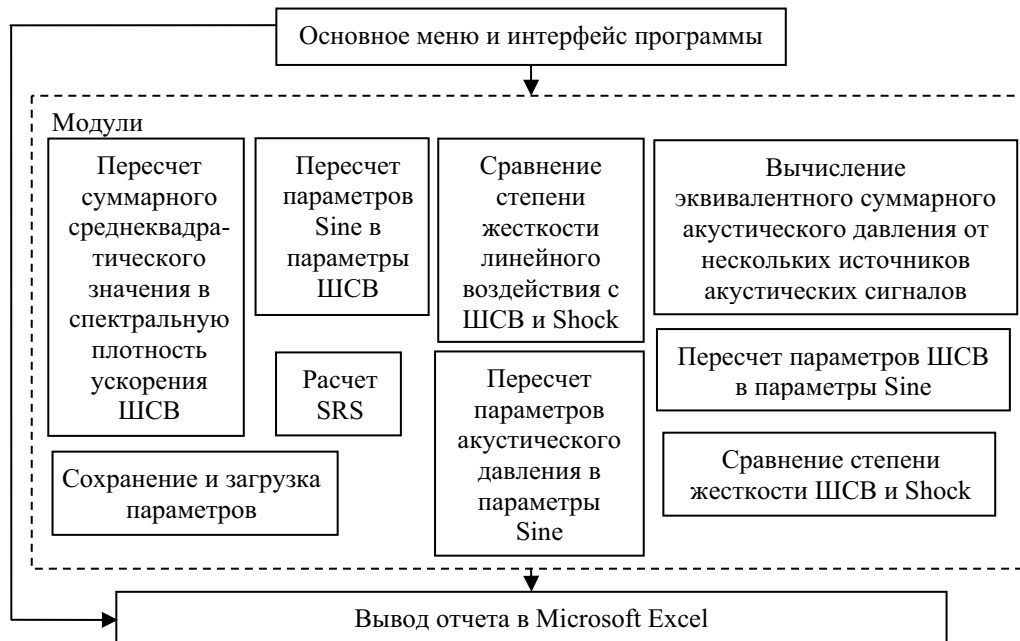


Рис. 2. Функциональная схема универсальной программы пересчета параметров механических и акустических нагрузок в эквивалентные

АЧХ пяти корпусов ЗРУ определены на вибрационной системе LDS V8–440T LPT1220C.

Далее проведен сравнительный анализ добротности Q и демпфирования C на близких частотах корпусов ЗРУ (таблица).

Таблица. Значения демпфирования и добротности на частоте первой моды ($f \approx 200$ Гц)

№ корпуса	Частота 1-го пика на АЧХ, Гц	Добротность	Частота 1-го пика по стабилизационной диаграмме, Гц	Демпфирование, %
1	212	42	160	0,70
2	178	89	190	0,46
3	191	64	170	0,65
4	236	40	170	0,86
5	198	198	170	0,19

В условиях отсутствия расчетных или статистических данных по демпфированию для различных типов разрабатываемых конструкции изделий за базовый оценочный критерий жесткости конструкции приняты реальные значения демпфирования, полученные в результате ее экспериментального модального анализа и подтвержденные значениями добротности на АЧХ.

Зависимость добротности Q от демпфирования C выражается формулой [5]

$$Q = \frac{1}{C} \sqrt{km},$$

где k – жесткость, а m – масса конструкции.

Таким образом, сильно демпфированная конструкция имеет низкую добротность, а слабо демпфированная – высокую.

По значениям добротности Q (полученным из АЧХ) и демпфирования C (полученным экспериментальным модальным анализом) на частоте первой моды $f \approx 200$ Гц, можно установить следующее:

- динамика значений демпфирования, определенных на модальных частотах, подтверждается динамикой значений добротности, определенных на АЧХ конструкции, а при условии что демпфирование и добротность конструкции ЗРУ получена на разных испытательных и программно-технических системах, можно утверждать о достаточной достоверности полученных данных. Имеющийся разброс значений демпфирования и добротности на резонансных частотах обусловлен присоединенной к конструкции корпуса ЗРУ дополнительной массой приспособления (при определении АЧХ) и ударным методом возбуждения сложной конструкции (при проведении экспериментального модального анализа);
 - низкое значение демпфирования, высокая добротность и форма «двойного пика» на первой резонансной частоте АЧХ корпуса № 5 (по существу двойной резонанс в узком частотном диапазоне) свидетельствуют о наличии дефекта (технологического или производственного) этого корпуса;
 - при отработке сложных или тяжелых конструкций возбуждение необходимо осуществлять случайным некоррелированным сигналом одновременно по трём ортогональным направлениям, применяя для этого модальные вибраторы.
- Сочетание аналитической и экспериментальной частей программно-аналитического модуля

обеспечивает реализацию его алгоритма, что позволяет определять реальные динамические характеристики конструкции с достаточной степенью достоверности, экспериментальным путем получать необходимую информацию для проведения конечно-элементного моделирования конструкций, а при проведении прочностных испытаний конструкции изделий обоснованно заменять типы и уровни нагрузок.

Программно-аналитический модуль реализуется и работает в операционной системе Microsoft Windows, имеет модульную структуру, открытую для включения специализированных программ; совместим по форматам импортируемых данных с программным обеспечением DACTRON Shaker

Control (проведение испытаний на МВВФ) и PULSE LabShop (экспериментальный модальный анализ).

Выводы

Рассмотрены спектры реакции конструкции космической техники при воздействии механических нагрузок различных типов. Представлен алгоритм компьютеризированной методики расчета реальных динамических характеристик конструкции изделий, работающей в среде MS Windows. Обоснована возможность замены одних типов механических нагрузок на другие, а также снижения воздействующей нагрузки с применением разрабатываемого программно-аналитического модуля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ME'scopeVES 4.0. Operating Manual. Vol. II – Command Reference // Vibrant technology, Inc. – 2003. – 335 p. 2003. URL: <http://www.vibetech.com/assets/mescope/MEscopeVESVolII.pdf> (дата обращения: 16.08.2010).
2. Трофимова Е.И., Федянин С.В. Механика с элементами математического моделирования и компьютерной графики: электронный учебник // Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина. – 2007. – Гл. 1. 2007. URL: http://elmehani-ka.elsu.ru/section/meenanical_oscillation.html (дата обращения: 16.08.2010).
3. Харрис С., Крид Ч. Справочник по ударным нагрузкам. – Л.: Судостроение, 1980. – 360 с.
4. Q factor // Wikipedia. The Free Encyclopedia. 2010. URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Q_factor (дата обращения: 16.08.2010).
5. Damping // Wikipedia. The Free Encyclopedia. 2010. URL: <http://en.wikipedia.org/wiki/Damping> (дата обращения: 16.08.2010).

Поступила 08.09.2010 г.